

• 组织和性能 •

38MnSiVS5 非调质钢的 CCT 曲线测定与分析

张 念¹ 陈章明¹ 赵红强¹ 郑文超¹ 罗时杰¹ 凌 鑫¹ 赵晓丽²

(1 湖北新冶钢有限公司技术中心,黄石 435001; 2 北京交通大学机械与电子控制工程学院,北京 100044)

摘 要 采用淬火膨胀仪、光学显微镜、维氏硬度计等研究了典型非调质钢 38MnSiVS5 (%: 0.37C, 0.78Si, 0.012P, 0.045S, 0.03Mo, 0.120V, 0.004Nb, 0.003Ti) 的显微组织和硬度。测定了其过冷奥氏体连续冷却转变 (CCT) 曲线。结果表明, 38MnSiVS5 钢的 CCT 曲线可分为高温转变区域、中温转变区域和低温转变区域。当冷却速度 ≤ 0.89 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 时为全高温转变区, 组织为铁素体和珠光体; 当冷却速度为 $1.78 \sim 4.45$ $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 时为高温、中温两相复合转变区, 组织为铁素体、珠光体和贝氏体; 当冷却速度为 8.9 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 时, 为高温、中温、低温三相复合转变区, 组织为铁素体、珠光体、贝氏体和马氏体; 当冷却速度为 17.8 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 时, 铁素体和珠光体消失, 为中温、低温两相复合转变区, 组织为贝氏体 + 马氏体; 当冷却速度 ≥ 44.5 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 时为马氏体转变区。随着冷却速度从 0.06 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 增大到 44.5 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$, 38MnSiVS5 钢的 HV5 显微硬度值由 213 增加至 568。

关键词 非调质钢 38MnSiVS5 连续冷却相变 显微组织 显微硬度 CCT 曲线

Determination and Analysis of CCT Curves of Non-Quenched and Tempered Steel 38MnSiVS5

Zhang Nian¹, Chen Zhangming¹, Zhao Hongqiang¹, Zheng Wenchao¹, Luo Shijie¹, Ling Xing¹ and Zhao Xiaoli²
(1 Technology Center, Hubei Xinyegang Steel Co Ltd, Huangshi 435001;

2 School of Mechanical, Electronic and Control Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044)

Abstract The microstructure and micro-hardness of typical non-quenched and tempered steel 38MnSiVS5 (%: 0.37C, 0.78Si, 0.012P, 0.045S, 0.03Mo, 0.120V, 0.004Nb, 0.003Ti) are analyzed by using thermal dilatometer, optical microscope and Vickers hardness tester. The continuous cooling transformation (CCT) curves of supercooled austenite are tested. The results show that the CCT curve of steel 38MnSiVS5 could be divided into high temperature transition region, middle temperature transition region and low temperature transition region. With cooling rate ≤ 0.89 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$, the high temperature transition region is formed with microstructure ferrite and pearlite; With the cooling rate $1.78 \sim 4.45$ $^{\circ}\text{C}/\text{s}$, the high temperature transition region and middle temperature compound transition region is formed with microstructure ferrite, pearlite and bainite; as the cooling rate up to 8.9 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$, the high temperature transition region, middle temperature transition region and low temperature transition region are formed with microstructure ferrite, pearlite, bainite and martensite; as the cooling rate up to 17.8 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$, the F + P structure disappears, the middle temperature transition region and low temperature transition region are formed, the microstructure is bainite and martensite; as the cooling rate ≥ 44.5 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$, the microstructure is martensite. With the increase of cooling rate from 0.06 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ to 44.5 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$, the HV5 micro-hardness number of 38MnSiVS5 steel increased from 213 to 568.

Material Index Non-Quenched and Tempered Steel 38MnSiVS5, Continuous Cooling Transformation, Microstructure, Micro-Hardness, CCT Curve

微合金非调质钢是在中碳锰钢的基础上添加微量合金元素 V、Nb、Ti 等, 再通过控轧控冷或控锻控冷等工艺, 在铁素体和珠光体组织中弥散析出碳 (氮) 化物达到提高材料强韧性的一类钢种^[1], 广泛应用于制造汽车曲轴、连杆、转向节、拉杆、轮毂等零部件。在非调质钢推广使用的过程中目前遇到的问题之一就是缺乏对其连续冷却转变行为规律的研究, 导致钢厂或下游的锻造厂对此类钢生产的控轧 (锻) 控冷工艺的制定缺少可循的依据, 难以确保钢材和锻件产品性能的稳定^[2-5]。

过冷奥氏体连续冷却转变 (CCT) 曲线能直观反映冷却速度对固态相变的影响规律, 是制定钢材热

处理冷却工艺的重要依据^[6-7]。本试验利用 DIL805L 型淬火膨胀仪、光学显微镜、维氏硬度计等仪器研究了典型非调质钢产品 38MnSiVS5 钢经完全奥氏体化后经不同冷却速度冷却至室温后的显微组织和显微硬度, 绘制了其奥氏体连续冷却曲线。

1 试验材料与方法

试验所用材料为湖北新冶钢有限公司生产的 $\Phi 90$ mm 38MnSiVS5 热轧圆钢, 生产流程为: 120 t BOF + LF + RH $\rightarrow$ 300 mm $\times$ 400 mm 连铸方坯 $\rightarrow$ 缓冷 $\rightarrow$ 加热 $\rightarrow$ 960 mm 连轧机组轧制成材 $\rightarrow$ 锯切、缓冷, 其化学成分见表 1。该钢多为热锻使用, 锻造产品 HV5 硬度值要求为 260 ~ 320。在试验钢上加工出

表 1 试验 38MnSiVS5 钢的化学成分 / %

Table 1 Chemical composition of test steel 38MnSiVS5 / %

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	V	Nb	Ti	N	O
0.37	0.78	1.45	0.012	0.045	0.16	0.03	0.03	0.03	0.120	0.004	0.003	0.012 0	0.000 45

尺寸为 $\Phi 4 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 的试样。

在 DIL805L 型淬火膨胀仪上测试试验钢的热膨胀曲线,按照 YB/T 5127-2018《钢的临界点测定方法-膨胀法》测得其临界点 A_{c1} (加热时珠光体向奥氏体转变的开始温度) 和 A_{c3} (加热时先共析铁素体全部溶入奥氏体的终了温度)。选定奥氏体化温度为 $910 \text{ }^{\circ}\text{C}$,将试样在膨胀仪真空状态下以 $10 \text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 的速度分别加热到 $910 \text{ }^{\circ}\text{C}$,保温 5 min 后,用高纯氮气控制冷速,分别以 $0.06, 0.14, 0.28, 0.89, 1.78, 4.45, 8.9, 17.8, 44.5 \text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 等冷却速度 ($V_c = 0.06 \sim 44.5 \text{ }^{\circ}\text{C/s}$) 冷却至室温,仪器系统记录试验过程中试样的长度变化量。试验结束后用 Origin 软件对数

据进行拟合成曲线,利用切线法确定曲线上拐点及其对应的温度,即确定相变点^[8]。

对试验后的试样进行研磨、抛光,采用 4% 硝酸酒精溶液腐蚀后,在光学金相显微镜 (型号: 德国蔡司 Axio Vert A1) 下观察组织。采用 TH 700 型维氏硬度计检测硬度,加载载荷为 5 kg ,加载时间 10 s ,测定试样的 HV5 硬度,试验结果至少为 6 个数据点的平均值。

2 试验结果与讨论

2.1 38MnSiVS5 钢不同冷却速度的显微组织和硬度

由图 1 可见,当冷速小于 $0.89 \text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 时仅存在铁

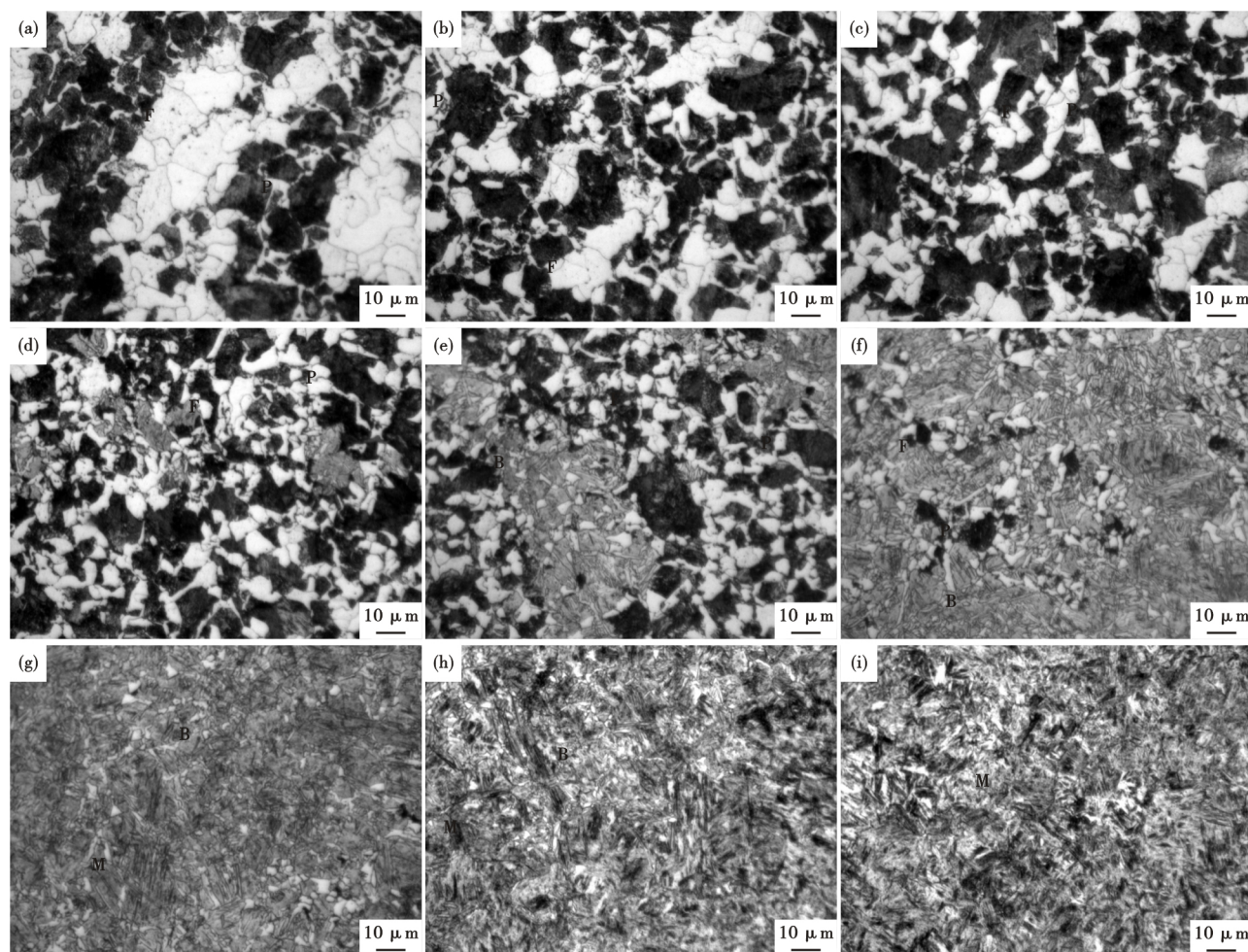


图 1 试验 38MnSiVS5 钢在冷速/ $(^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1})$: 0.06 (a); 0.14 (b); 0.28 (c); 0.89 (d); 1.78 (e); 4.45 (f); 8.9 (g); 17.8 (h); 44.5 (i) 的金相组织: (a) ~ (d) F + P; (e) ~ (f) F + P + B; (g) F + P + B + M; (h) B + M; (i) M

Fig. 1 Microstructures of test steel 38MnSiVS5 at different cooling rates / $(^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1})$: 0.06 (a); 0.14 (b); 0.28 (c); 0.89 (d); 1.78 (e); 4.45 (f); 8.9 (g); 17.8 (h); 44.5 (i): (a) ~ (d) F + P; (e) ~ (f) F + P + B; (g) F + P + B + M; (h) B + M; (i) M

素体和珠光体组织,随着冷却速度的加大,铁素体含量逐渐减少(图 1a~d);当冷却速度增加到 $1.78\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 时组织中出现贝氏体(图 1e);当冷却速度增加到 $8.9\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 时组织中出现马氏体(图 1g);当冷却速度增加到 $17.8\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 时,铁素体和珠光体消失,组织为贝氏体和马氏体(图 1h);当冷却速度增加到 $44.5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 时的组织全部为马氏体组织(图 1i)。

由表 2 可见,随着冷却速度的增加,硬度呈现增加趋势。进一步分析发现,当冷却速度小于 $1.78\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 时,硬度随着冷却速度增加上升比较平稳,当冷却速度大于 $1.78\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 时,硬度显著增加。

2.2 38MnSiVS5 钢的热膨胀曲线

试样从室温以 $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 加热速度加热到 $910\text{ }^{\circ}\text{C}$,在此过程中试样先经过 A_{c1} 点 $760\text{ }^{\circ}\text{C}$ 开始奥氏体化,曲线出现显著的拐点,随后到达 A_{c3} 点 $850\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后进入完全奥氏体化状态,至此加热过程中的相变点结束,保温 5 min 后试样进行冷却速度控制,得到试验钢在不同冷速下的热膨胀曲线见图 2。从冷却

表 2 试验钢 38MnSiVS5 在不同冷速后的 HV5 显微硬度值
Table 2 Micro-hardness (HV5) value of test steel 38MnSiVS5 after different cooling rates

冷速/ ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$)	HV5 硬度值测定数据点						平均值
0.06	223	211	216	209	205	215	213
0.14	238	232	230	236	226	237	233
0.28	241	239	235	242	247	244	241
0.89	267	265	258	275	281	277	271
1.78	295	280	305	287	296	332	299
4.45	367	379	398	378	394	353	378
8.90	432	419	450	408	435	440	431
17.8	526	477	484	490	528	516	504
44.5	570	567	576	559	569	565	568

阶段可以发现,当冷速较小于 $0.89\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 仅存在两个拐点,即高温转变区的开始与结束点(图 2a~d);当冷却速度增加到 $1.78\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 时除高温相变点外,出现贝氏体转变点(图 2e);当冷却速度增加到 $8.9\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 时除高温、中温相变点外,出现低温马氏体转变点(图 2g);当冷却速度增加到 $17.8\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 时高温转变区消失,存在中温、低温相变点(图 2h);当冷却速度增加到 $44.5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 时,高温、中温相变点消失,仅

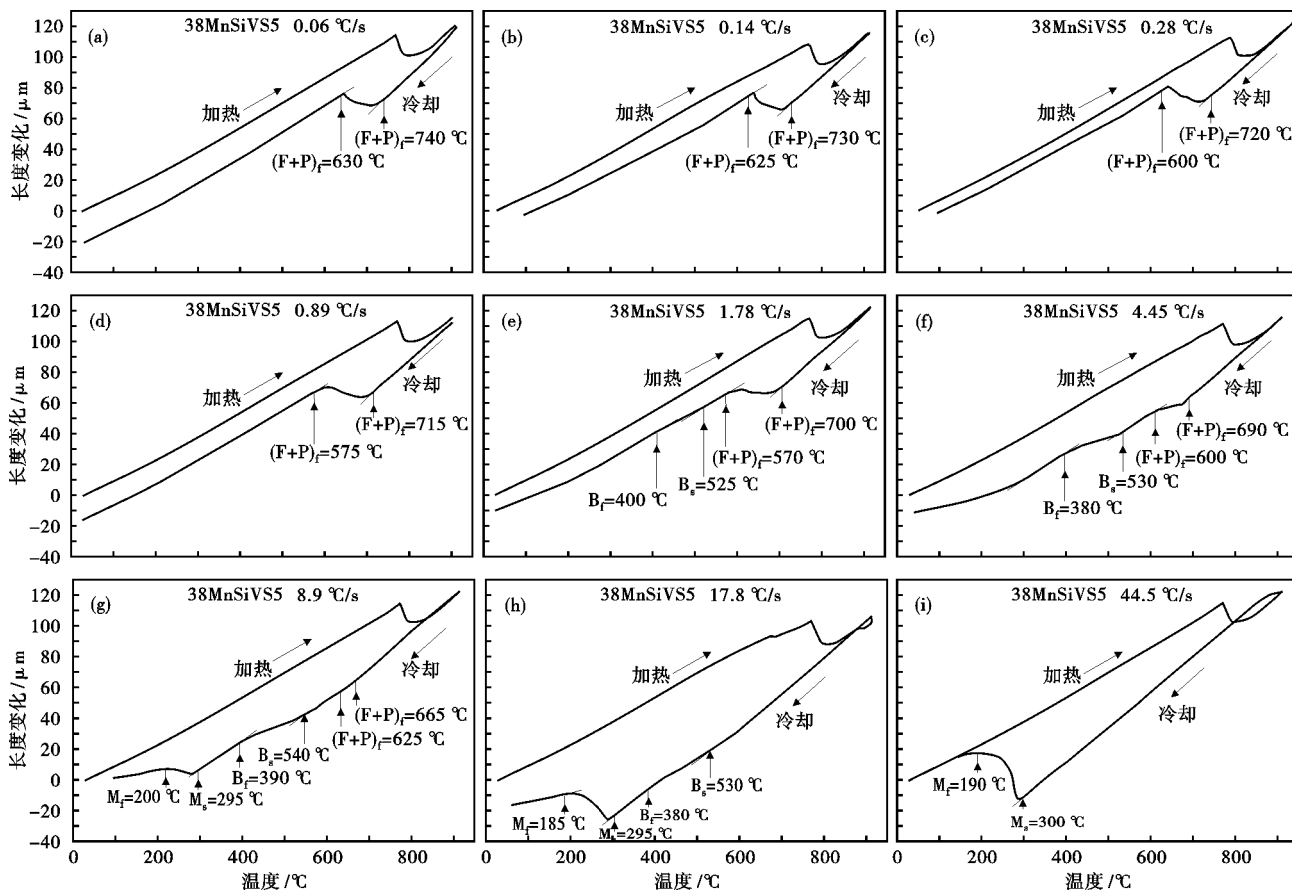


图 2 试验 38MnSiVS5 钢冷速/ $(^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1})$: 0.06 (a); 0.14 (b); 0.28 (c); 0.89 (d); 1.78 (e); 4.45 (f); 8.9 (g); 17.8 (h); 44.5 (i) 的热膨胀曲线

Fig. 2 Thermal expansion curve of test steel 38MnSiVS5 at cooling rates $/(^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1})$: 0.06 (a); 0.14 (b); 0.28 (c); 0.89 (d); 1.78 (e); 4.45 (f); 8.9 (g); 17.8 (h); 44.5 (i)

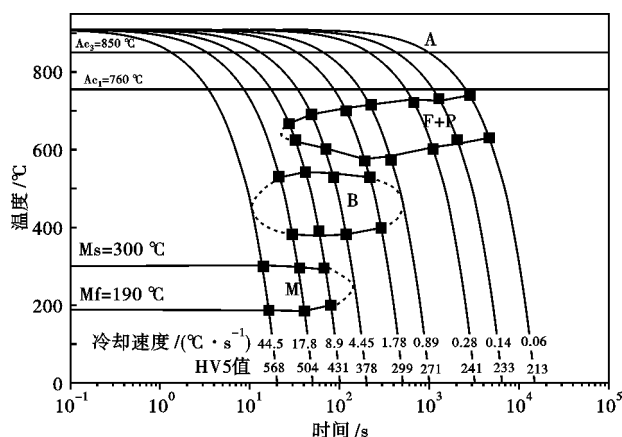


图3 试验 38MnSiVS5 钢的 CCT 曲线

Fig. 3 CCT curves of test steel 38MnSiVS5

存在低温马氏体转变点 (图 2i)。

2.3 动态 CCT 曲线

图 3 是综合试验钢在不同冷速后获得的热膨胀曲线、金相组织、硬度而得到的 CCT 曲线。从图 3 中可以看出,当冷却速度小于 0.89 °C/s 时为全高温转变区,组织为铁素体和珠光体;当冷却速度在 1.78 ~ 4.45 °C/s 时为高温、中温两相复合相变区,组织为铁素体、珠光体和贝氏体;当冷却速度为 8.9 °C/s 时,为高温、中温、低温三相复合转变区,组织为铁素体、珠光体、贝氏体和马氏体;当冷却速度为 17.8 °C/s 时,高温相变区消失,为中温、低温两相复合转变区,组织为贝氏体和马氏体;当冷却速度大于 44.5 °C/s 时为全低温马氏体转变区。

3 结果分析与讨论

当冷却速度小于 1.78 °C/s 时,随着冷却速度的增大,铁素体析出温度、珠光体转变开始温度和结束温度降低。主要原因是随着冷却速度增大,过冷度增大,临界形核自由能逐渐减小,使形核更易发生,因此相变点温度降低^[9]。随着冷却速度的增加 (1.78 ~ 44.5 °C/s),奥氏体的过冷度进一步增大,原子的扩散速度减小,高温转变受到抑制,此时相变以中温和低温转变为主,组织以贝氏体和马氏体为主。当冷却速度增加到 44.5 °C/s 以上时,高温和中温相变区消失,此时全部为马氏体组织^[10]。

从表 2 可以看出,当冷却速度小于 1.78 °C/s 时,硬度随着冷却速度增加上升比较平稳,这是由于随着冷却速度增加铁素体含量逐渐较少,晶粒细化导致硬度升高。当冷却速度大于 1.78 °C/s 时,硬度显著增加,这是由于此时相变以中温和低温相变为主,组织以贝氏体和马氏体为主。当组织全部转

变为马氏体组织时,HV5 硬度值为 568。

4 结论

(1) 采用膨胀法并结合金相-硬度法测得了典型非调质钢 38MnSiVS5 的连续冷却转变 (CCT) 曲线,试验 38MnSiVS5 钢的临界温度为: $Ac_1 = 760$ °C, $Ac_3 = 850$ °C, $Ms = 300$ °C。

(2) 38MnSiVS5 钢的 CCT 曲线可分为高温、中温和低温 3 个转变区域,且各相区相互分离。

(3) 当冷却速度小于 0.89 °C/s 时为全高温转变区,组织为铁素体和珠光体,HV5 硬度值为 213 ~ 271;随着冷却速度增加 (1.78 ~ 44.5 °C/s) 开始发生中温和低温转变,铁素体和珠光体组织逐渐减少,以贝氏体和马氏体组织为主,HV5 硬度值增加到 299 以上;当冷却速度增加到 44.5 °C/s 以上时全部为马氏体组织,HV5 硬度值达到 568。

(4) 根据试验结果,试验 38MnSiVS5 钢推荐锻后冷却速度为 0.89 ~ 1.78 °C/s,此时 HV5 硬度值为 271 ~ 299,过高的硬度和大量的贝氏体组织可能会导致后续机加工出现问题。

国家“十三五”重点研发计划项目资助 (No. 2016YFB0300100)

参考文献

- [1] 王荣滨, 雪浪. 非调质钢在汽车工业中的应用 [J]. 上海钢研, 2002, 8(1): 31-35.
- [2] 陈思联, 惠卫军, 王连海, 等. 节能低成本高品质非调质钢的研发 [J]. 钢铁, 2014, 49(6): 1-7.
- [3] 陈蕴博, 马鸣图, 王国栋. 汽车用非调质钢的研究进展 [J]. 中国工程科学, 2014, 16(2): 4-17, 45.
- [4] 董成瑞, 任海鹏, 金同哲, 等. 微合金非调质钢 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2000.
- [5] 陈蕴博, 马 伟, 王云生, 等. 铁素体-珠光体型非调质钢及其控制冷技术 [J]. 金属热处理, 1997, 22(6): 7-9.
- [6] 徐 光, 王 巍, 张鑫强, 等. 金属材料 CCT 曲线测定及绘制 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.
- [7] 张世中. 钢的过冷奥氏体转变曲线图集 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1993: 18-20.
- [8] 林慧国, 傅代直. 钢的奥氏体转变曲线原理、测试与应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1998: 256-270.
- [9] 秦炳雪, 周旭东. SPCC 钢 CCT 曲线测定与分析 [J/OI]. 热加工工艺, 2017, 46(2): 89-91.
- [10] 史 远, 戴观文, 安治国, 等. 46MnVS6 非调质钢的过冷奥氏体连续冷却相变 [J]. 机械工程材料, 2018, 42(2): 43-46.

张 念(1989-), 男, 工程师, 2011 年武汉科技大学(本科)毕业, 非调质钢产品开发和工艺研究。

E-mail: zhangnian@citicsteel.com

收稿日期: 2021-05-26